

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МЕТОДА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЯНО-КОЛЫМСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

А.В. Ткачев, И.М. Хасанов, Т.И. Михалицына

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,  
685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия*

Приводятся данные проведенных исследований методом вызванной поляризации (ВП) на ряде золоторудных месторождений и рудопроявлений Магаданской области. Результаты геофизических работ позволяют с достаточной эффективностью изучать золоторудные месторождения золото-кварцевой формации, имеющие различный морфологический (жильный, прожилково-жильный, прожилково-вкрапленный) тип. Установлено, что метод ВП в многочастотном варианте уверенно выделяет области и зоны углеродистого метасоматоза, являющегося надежным индикатором золоторудной перспективности исследуемых территорий северо-востока России. Признаком углеродистого метасоматоза является типичная форма фазочастотной характеристики, свойственная графиту и графитизированным породам.

*Вызванная поляризация, фазочастотные характеристики, двухчастотный фазовый параметр, графитизация, углеродистый метасоматоз.*

## GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL INTERPRETATION OF INDUCED POLARIZATION DATA ON GOLD DEPOSITS IN THE YANA-KOLYMA OROGENIC BELT

A.V. Tkachev, I.M. Khasanov, and T.I. Mikhailitsyna

This paper presents induced polarization (IP) data on a number of gold deposits and occurrences in the Magadan Region. Geophysical works are effective for the study of gold-quartz deposits of different morphological types (vein, veinlet-vein, and veinlet-disseminated). It is shown that multifrequency IP sounding reliably identifies zones of carbon metasomatism, a reliable indicator of potential gold mineralization areas in north-eastern Russia. Carbon metasomatism is the typical shape of phase frequency response curves for graphite and graphitized rocks.

*Induced polarization, phase frequency response, two-frequency phase parameter graphitization, carbon metasomatism*

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день метод вызванной поляризации, основанный на изучении полей, создаваемых в земле вторичными электрическими зарядами при пропускании через нее постоянного или переменного низкочастотного электрического тока, имеет большой вес и особое положение в комплексе геофизических электроразведочных работ, поскольку является прямым геофизическим методом на обнаружение сульфидной минерализации, сопутствующей золотому оруденению. Присутствие углеродистого вещества затрудняет выделение областей сульфидизированных гидротермально измененных пород, однако зачастую само по себе может служить достаточно надежным признаком наличия золотого оруденения.

Основной целью представленной работы является разработка методических приемов уверенного выделения областей и зон углеродистого метасоматоза, являющегося одним из индикаторов прогнозирования золоторудной минерализации различных морфогенетических типов в условиях северо-востока России на фоне сульфидной минерализации и в обстановке повсеместного развития мерзлых пород. Горно-технические условия большинства поисковых участков делают невозможным применение неполяризуемых электродов, в связи с чем все работы методом ВП производились в частотной области.

### СООТНОШЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВП С ВЕЩЕСТВЕННЫМ СОСТАВОМ ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Изучением данного вопроса занимались и занимаются многие ученые за рубежом [Pelton et al., 1978; Zonge et al., 1980; Weller et al., 2010; Hubbard et al., 2014], в Советском Союзе [Кормильцев, Жаво-

ронкова, 1972; Улитин и др., 1972; Человечков и др., 1972; Сарбаш и др., 1980; Лемец и др., 1983] и в России [Куликов, Яковлев, 2008]. Результатом исследований можно считать установление факта зависимости формы частотных характеристик от вещественного состава поляризующихся объектов и от способа распределения минералов в рудах (вкрапленный, прожилковый, массивный), что может быть использовано при классификации аномалий поляризуемости по их геологической природе.

Большой объем исследований был проведен сотрудниками Казахского филиала Всесоюзного института разведочной геофизики (ВИРГ) в восьмидесятих годах прошлого столетия [Лемец и др., 1983, 1986]. В этих работах изложена методика исследований фазовых частотных характеристик (далее ФЧХ) на основании анализа параметров  $f_{\max}$  и  $K_{\varphi}$ , где  $f_{\max}$  — частота максимума фазовой частотной характеристики, коэффициент  $K_{\varphi}$  — величина, пропорциональная углу наклона кривых зависимости фазового параметра от частоты, определяемая следующим выражением:

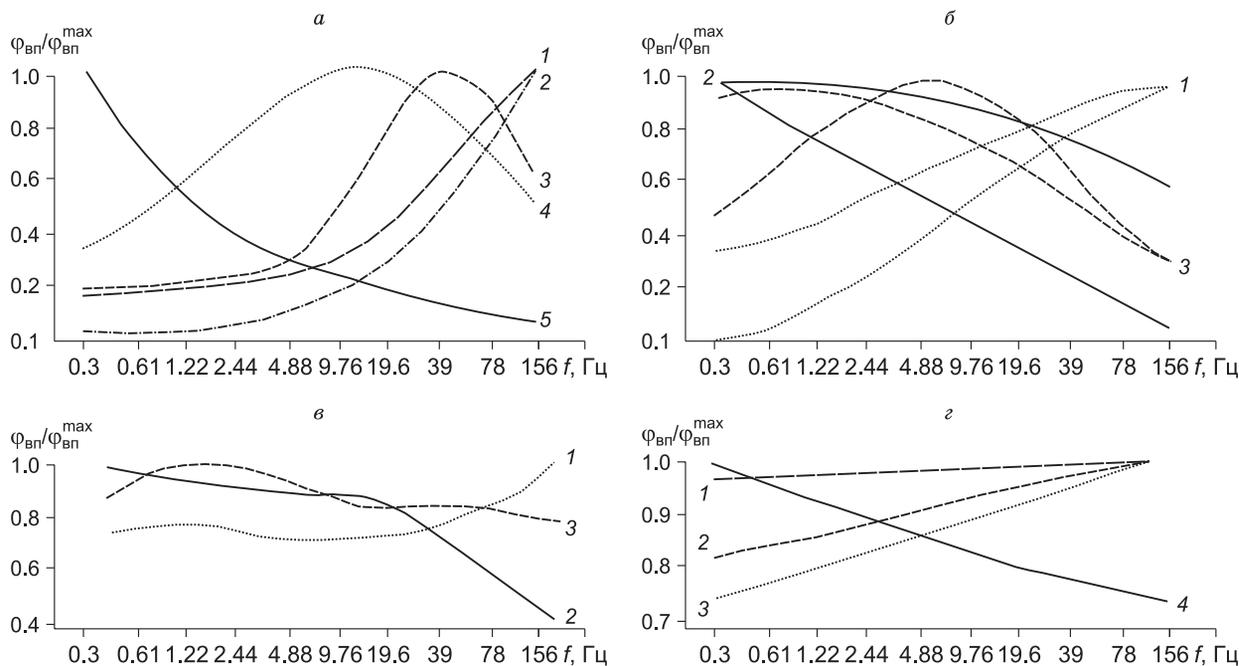
$$K_{\varphi} = \frac{\lg \varphi_2 / \lg \varphi_1}{m} \cdot 10^2.$$

Здесь  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$  — соответственно значения двухчастотного фазового параметра на верхней ( $f_2$ ) и нижней ( $f_1$ ) рабочих частотах интервала частот, используемого для определения  $K_{\varphi}$ ,  $m$  — количество октав в интервале  $f_2 - f_1$  (одна октава соответствует отношению рабочих частот, равному 2) [Лемец и др., 1983, 1986].

Исследования проводились аппаратурой ЭВП-203 в диапазоне частот от 0.3 до 156 Гц в лабораторных и полевых условиях.

На рис. 1 приведены фазовые частотные характеристики двухчастотного фазового параметра на чистых металлах и электротехническом графите, образцах горных пород и руд и над различными геологическими объектами в природных условиях. Для большей наглядности ФЧХ нормированы по величине фазового параметра в экстремумах кривых, в связи с чем знак отношения положительный, тогда как на самом деле знак фазового параметра отрицательный.

Для однородных по составу металлов устанавливается четкая зависимость частоты максимума  $f_{\max}$  от положения этих металлов в известном из электрохимии ряде активности металлов (см. рис. 1, а). Для графита величина  $f_{\max}$  находится ниже 0.3 Гц и в данном диапазоне частот имеет противоположный угол наклона ( $K_{\varphi} < 0$ ). Для образцов халькопирит-пиритовых руд наблюдается тенденция к увеличению  $f_{\max}$  по мере роста размеров поляризующихся включений (см. рис. 1, б). Так, если для образцов с рас-



**Рис. 1. Фазовые частотные характеристики чистых металлов и электротехнического графита (а), образцов скарновых медно-магнетитовых руд (б) и медно-порфириновых руд (в) над различными геологическими объектами в природных условиях (г) (по материалам КазВИРГ, 1983).**

а — 1 — свинец, 2 — алюминий, 3 — медь, 4 — серебро, 5 — графит; б, в — 1 — вкрапленные руды, 2 — сплошные руды, 3 — прожилково-вкрапленные руды; г — 1 — скарновые медно-магнетитовые руды, 2 — медно-порфириновые руды, 3 — пиритизированные породы, 4 — углисто-графитизированные породы.

сеянной вкрапленностью сульфидов величина  $f_{\max}$  больше 156 Гц, то для сплошных руд частота максимума  $\varphi_{\text{ВП}}$  может составлять 0.3 Гц и ниже. В отдельных случаях на частотных характеристиках может наблюдаться два максимума  $f_{\max}$  (см. рис. 1, *в*), что отражает два различных процесса ВП.

Данные лабораторных измерений на образцах сульфидных руд [Лемец и др., 1983, 1986] позволили сделать вывод, что положение максимума  $\varphi_{\text{ВП}}$  на оси частот и величина  $K_{\varphi}$  в большей степени зависят от структурно-текстурных факторов, чем от вещественного состава. Для массивных руд максимум частотной характеристики наблюдается в области низких частот, за пределами изучаемого частотного диапазона. Для образцов прожилково-вкрапленных руд максимум на частотной характеристике наблюдается в области частот 1—10 Гц, у образцов вкрапленных руд максимум расположен в области высоких частот, зачастую также за пределами изучаемого частотного диапазона.

В природных условиях над сульфидными образованиями и графитизированными породами частотные характеристики  $\varphi_{\text{ВП}}$  в диапазоне 0.3—156 Гц, как правило, имеют вид монотонно изменяющихся кривых (см. рис. 1, *з*). Наблюдаемые отрезки ФЧХ в этих случаях хорошо аппроксимируются прямыми линиями с различными угловыми коэффициентами. В ряде случаев были отмечены частотные характеристики  $\varphi_{\text{ВП}}$  более сложной формы, имеющие отрицательное значение  $K_{\varphi}$  в диапазоне 0.07—0.30 Гц и положительные значения коэффициента в диапазоне 1.2—156 Гц. Судя по результатам лабораторных исследований, это объясняется разнородным составом объектов, одна из компонент которого характеризуется отрицательными значениями коэффициента, другая — положительными.

По данным большого количества полевых измерений на аномалиях поляризуемости в рудных районах Казахстана было установлено, что наименьшие по величине значения  $K_{\varphi}$  фиксируются над скарновыми медно-магнетитовыми и прожилковыми пиритовыми рудами, наибольшие значения коэффициента — над зонами вкрапленности пирита. Для углисто-графитизированных пород характерны отрицательные значения  $K_{\varphi}$  [Лемец и др., 1983, 1986].

### ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ

Прежде всего, следует отметить, что авторам удалось выявить практически все типы ФЧХ, описанные в трудах сотрудников КазВИРГ.

На рис. 2, *а* представлены ФЧХ простой формы с одним максимумом в диапазоне частот 2.44—39 Гц либо находящимся выше 78 Гц или ниже 0.305 Гц. Рис. 2, *б* демонстрирует ФЧХ сложной формы с двумя максимумами. Наиболее распространенными следует признать ФЧХ с индексом «1» и «2», для которых величина  $f_{\max}$  находится выше 78—156 Гц, однако достаточно широкое распространение имеет также семейство характеристик, изображенных на рис. 2, *б*. Сопоставление полученных данных с геологическим материалом показывает очень хорошую сходимость результатов исследований с выводами, сделанными в КазВИРГ. Так, ФЧХ с индексом «3» является типичной для углеродистых осадочных отложений, ФЧХ с индексами «4», «5», «6», «7», «8» получены над зонами прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации. В то же время кривые с индексом «1» и «2», согласно работам [Лемец и др., 1983, 1986], должны соответствовать вкрапленной и рассеянной сульфидной минерализации. В действительности это можно сказать только о ФЧХ с индексом «2», тогда как ФЧХ с индексом «1» зареги-

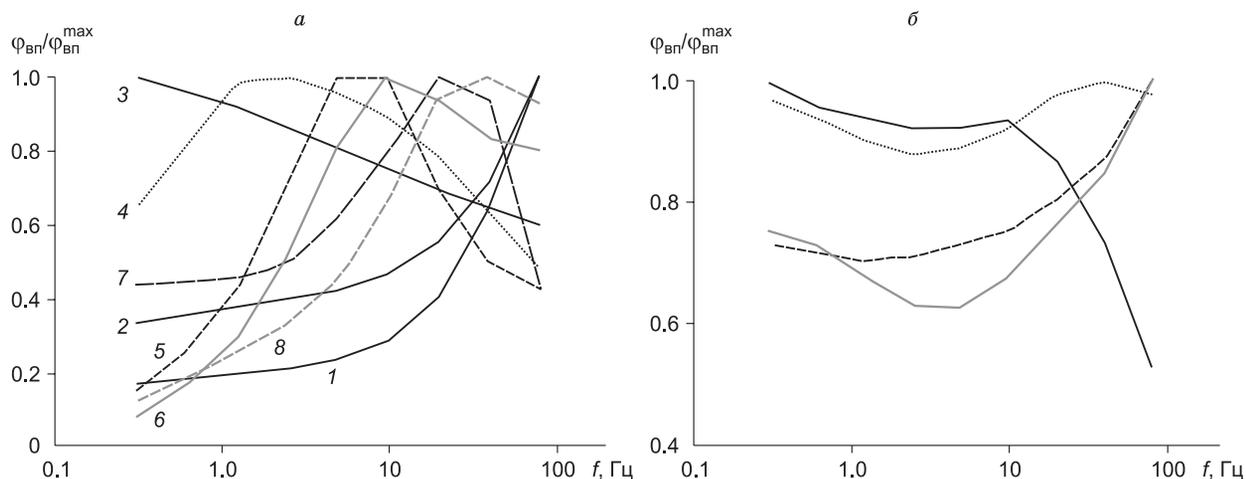


Рис. 2. Типы ФЧХ, выявленные на рудопроявлениях Магаданской области с одним максимумом (*а*), с двумя максимумами (*б*).

Расшифровка индексов кривых дана в тексте.

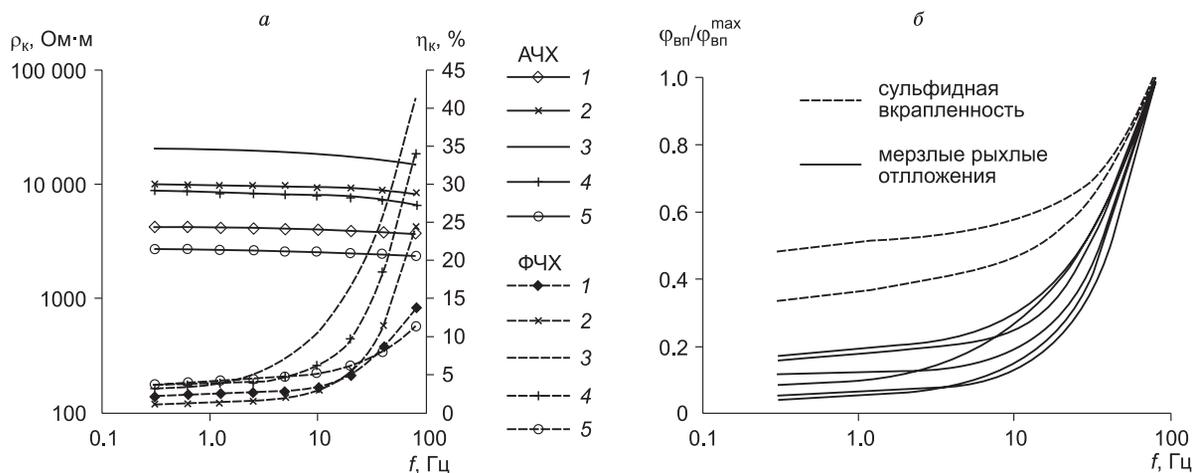


Рис. 3. Типичные ФЧХ и АЧХ (а) мерзлых четвертичных отложений (1—4), вкрапленной минерализации (5); нормированные ФЧХ (б) для тех же типов пород.

стрирована над мерзлыми четвертичными отложениями. Данное обстоятельство побудило авторов более подробно исследовать частотные характеристики мерзлых рыхлых отложений, в результате чего была установлена аномально высокая поляризуемость в области частот выше 10 Гц (рис. 3, а). На этом рисунке фазовые частотные характеристики представлены в виде зависимости от частоты параметра кажущейся поляризуемости  $\eta_k (\%) = -2.5 \cdot \varphi_{вп}$  [Комаров, 1980; Куликов и др., 1985; Лемец и др., 1986], амплитудные частотные характеристики (АЧХ) показывают зависимость от частоты удельного электрического сопротивления. В области высоких частот прослеживается явная тенденция увеличения поляризуемости среды в зависимости от величины удельного сопротивления. Скорее всего, аномально высокая поляризуемость обусловлена степенью льдистости четвертичных отложений.

Для вкрапленной сульфидной минерализации характерны пониженные значения поляризуемости в области высоких частот и несколько повышенные значения  $\eta_k$  в области низких частот, что становится более заметным при рассмотрении нормированных ФЧХ (см. рис. 3, б). Как следует из рис. 1, значение нормированного фазового параметра для вкрапленной минерализации в диапазоне низких частот  $> 0.2$ , вычисленные значения параметра, полученные для мерзлых рыхлых отложений,  $< 0.2$ . Надо признать, что в настоящее время непонятно, может ли значение параметра  $> 0.2$  на частотах ниже 1 Гц служить признаком сульфидной вкрапленности при производстве работ в условиях мерзлых пород разреза. Очевидно, что этот вопрос требует отдельного серьезного изучения. На данный момент достаточно надежным дополнительным критерием для выделения сильнольдистых пород может служить их аномально высокое удельное сопротивление (см. рис. 3). Этот факт хорошо согласуется с исследованиями [Шестернев и др., 2003; Смирнова, Оленченко, 2006], где показано, что мерзлые породы, создающие аномалии ВП с величиной, постоянной времени переходного процесса около 0.1 мс (т. е. на высоких частотах), сопровождаются аномалиями высокого удельного сопротивления.

По данным работ [Лемец и др., 1983, 1986], ФЧХ с максимумом  $f_{max}$ , находящимся ниже частоты 0.305 Гц, могут соответствовать либо углисто-графитизированным породам, либо сплошным рудам (см. рис. 1). На образце сплошных медно-порфировых руд получена ФЧХ с двумя максимумами — на частотах  $> 0.305$  и 9.7 Гц.

Аналогичные фазовые частотные характеристики, имеющие максимум  $f_{max}$  ниже 0.305 Гц, зарегистрированы на различных рудопроявлениях Магаданской области, где в ходе детальных горно-поисковых работ канавами и бурением прослеживались и опробовались рудные тела золото-кварцевой формации: кварцевые жилы и прожилково-жильные зоны, минерализованные зоны дробления и дайки кислого и среднего состава. Рудная минерализация представлена рассеянной вкрапленностью преимущественно пирита, арсенопирита, халькопирита и сфалерита в крайне незначительном объеме (1—3 %), в подчиненном количестве присутствует пирротин, шеелит и др. Более значимые по объему (5—7 %) проявления вкрапленной и прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации отмечаются в экзоконтактах и надинтрузивных зонах интрузивных образований. Сплошные руды на объектах исследования методом многочастотного профилирования, анализируемые авторами в настоящей публикации, не выявлены. Таким образом, возникает предположение, что причиной столь характерного поведения ФЧХ в области низких частот является графитизация.

## ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ВП

Авторы в течение 2008-2014 гг. проводили исследования методом ВП на ряде золоторудных месторождений и рудопроявлений Магаданской области. В настоящей статье сделана попытка оценить возможности вышеизложенных интерпретационных методических приемов применительно к геологическим условиям северо-востока России, для чего были изучены фазовые частотные характеристики, полученные при измерениях в частотном варианте метода ВП с аппаратурой ИМВП-8. Для минимизации влияний индукционных процессов исследования проводились во внешнем градиенте трехэлектродной установки с небольшими (первые сотни метров) размерами питающей линии.

Все участки работ расположены на территории Яно-Колымской складчатой системы (далее ЯКСС) (Магаданская область — Центрально-Колымский регион). В геологическом строении принимают участие в различной степени метаморфизованные терригенные породы верхоянского комплекса. Отложения прорваны крупными плутонами гранитов, гранодиоритов и мелкими интрузиями различного состава. Среди магматических образований установлены реликты раннепозднемелового вулканизма [Горячев, 2003]. В качестве эталонного участка для изучения фазовых частотных характеристик, отвечающих графитизированным породам, была выбрана долина р. Токичан в непосредственной близости от одноименного месторождения, где под четвертичные отложения выходят породы нижнесреднепермского возраста пионерской свиты  $P_{1,2}pn$ .

На аномально низкое сопротивление ( $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и менее) и высокую поляризуемость отложений  $P_{1,2}pn$  (до 20 % и более) указывали многие исследователи. Типичные кривые ВЭЗ-ВП в импульсном и частотном режиме измерения приведены на рис. 4. Предшественниками было обозначено, что при работе в импульсном режиме фоновая поляризуемость на участке работ для задержки 0.5 составила 10 %, что соответствует фону полиметаллического месторождения, хотя на отработанном участке электронные проводники в таком количестве нигде не отмечены. Это действительно так, если под электронными проводниками подразумевать рудные минералы. Но электронной проводимостью за счет  $\pi$ -электронов внутренних орбит обладает также графит, отличающийся низким сопротивлением и высокой поляризуемостью [Комаров, Рысс, 1959; Тархов, Федынский, 1980; Дортман, 1984]. Благодаря очень высокой электропроводности графита, сопротивление графитизированных пород колеблется от единиц до сотен  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Содержание 3—7 % чешуйчатого графита в породе вызывает понижение ее сопротивления до 10  $\text{Ом}\cdot\text{м}$  и менее, 10—15 % — до  $(1-5)\cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  [Тархов, Федынский, 1980; Дортман, 1984].

В ходе полевых исследований скважинами малоглубинного колонкового бурения в днище долины р. Токичан на всю ее ширину под 2–15-метровым слоем рыхлых отложений (мерзлый аллювий и гале-эфельные отвалы) вскрыты метаморфически измененные углистые алевролиты пионерской свиты с редкими прослоями аргиллитов и тонкомелкозернистых песчаников. Породы интенсивно трещиноваты, часто передроблены, карбонатизированы и изобилуют многочисленными графитизированными зонами милонитизации, характеризуются неравномерной, но в целом весьма интенсивной пиритизацией и наличием тонкого кварцевого (в редких случаях кварц-сульфидного) прожилкования.

Описание шлифов из образцов керна скважин позволило установить в породах пионерской свиты наличие углеродистого вещества ( $C_{орг}$ ) и графита, развигото как в цементе, так и по трещинам квиважа [Шарафутдинов и др., 2008]. В непосредственной близости от бурового профиля авторами пройден про-

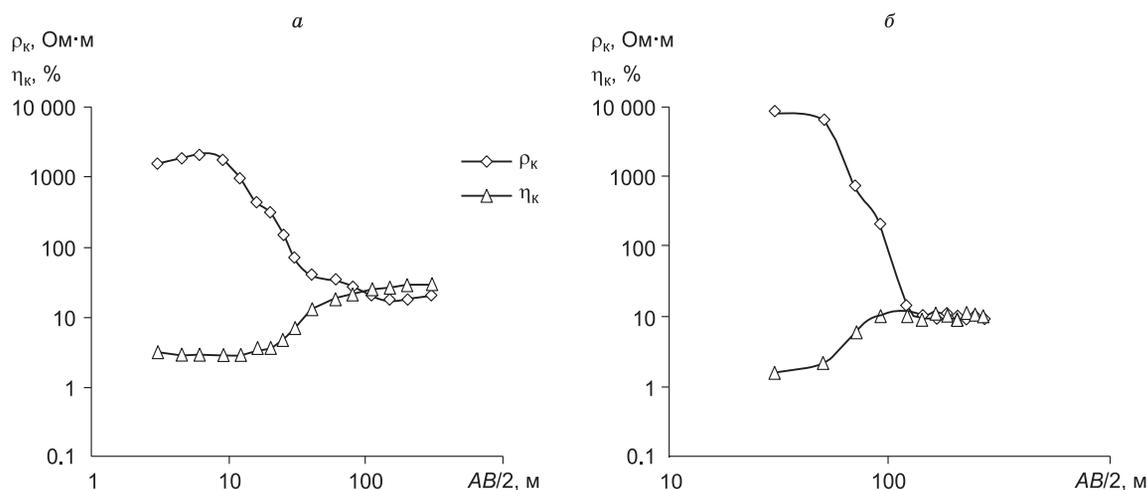
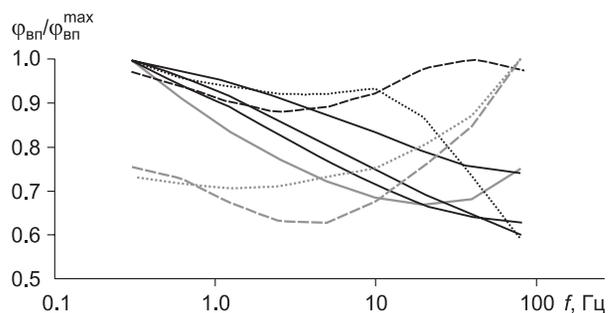


Рис. 4. Типичные кривые ВЭЗ-ВП над выходами пород пионерской свиты под мерзлые четвертичные отложения при импульсном (а) и частотном (б) режимах измерений.

**Рис. 5. Типичные ФЧХ, зарегистрированные над отложениями пионерской свиты.**



филь многочастотных (0.305—78 Гц) электроразведочных исследований. Типичные нормированные фазовые частотные характеристики, зарегистрированные над отложениями  $P_{1-2}np$ , показаны на рис. 5. Как хорошо заметно, их общей отличительной особенностью является ниспадающая левая ветвь, более или менее хорошо проявленная в интервале частот от 0.305 до 2.44—78 Гц и отражающая наличие графитовой минерализации. Присутствующие на отдельных ФЧХ максимумы на частотах выше 10 Гц, судя по описанию керна, отражают присутствие вкрапленной сульфидной минерализации. Однако такой вывод можно принять для результатов исследований в пределах таликовых зон. Наличие в разрезе мерзлых пород не позволяет считать этот вывод однозначным, по крайней мере, для кривых с максимумами на частотах выше 78 Гц.

Тем не менее, по мнению авторов, описанные выше результаты показывают безусловную целесообразность подобных исследований, так как подтверждают принципиальную возможность разделения аномального эффекта ВП в частотной области по минеральному составу и генезису поляризуемых включений и позволяют несколько по-иному взглянуть на проблему геологической интерпретации аномалий поляризуемости в условиях развития многолетнемерзлых толщ. Положительный опыт подобных исследований методом ВП в импульсном режиме [Шестернев и др., 2003; Смирнова, Оленченко, 2006; Паздникова и др., 2010] дает возможность надеяться на получение аналогичных результатов в частотной области.

В случае, когда на рассматриваемой территории проявления массивных руд отсутствуют или не являются типичными, исследования ФЧХ позволяют уверенно выделять области развития графитовой минерализации. Достаточно быстро и эффективно это можно сделать по параметру  $K_{\varphi}$ , который, как отмечалось выше, у графитизированных пород имеет отрицательное значение. Принимая во внимание, что на кривых ФЧХ возможно присутствие второго максимума, влияние которого на форму кривой может проявляться, начиная с частот 1.22—2.44 Гц (см. рис. 5), коэффициент  $K_{\varphi}$  целесообразно вычислять в интервале частот 0.305—1.220 Гц.

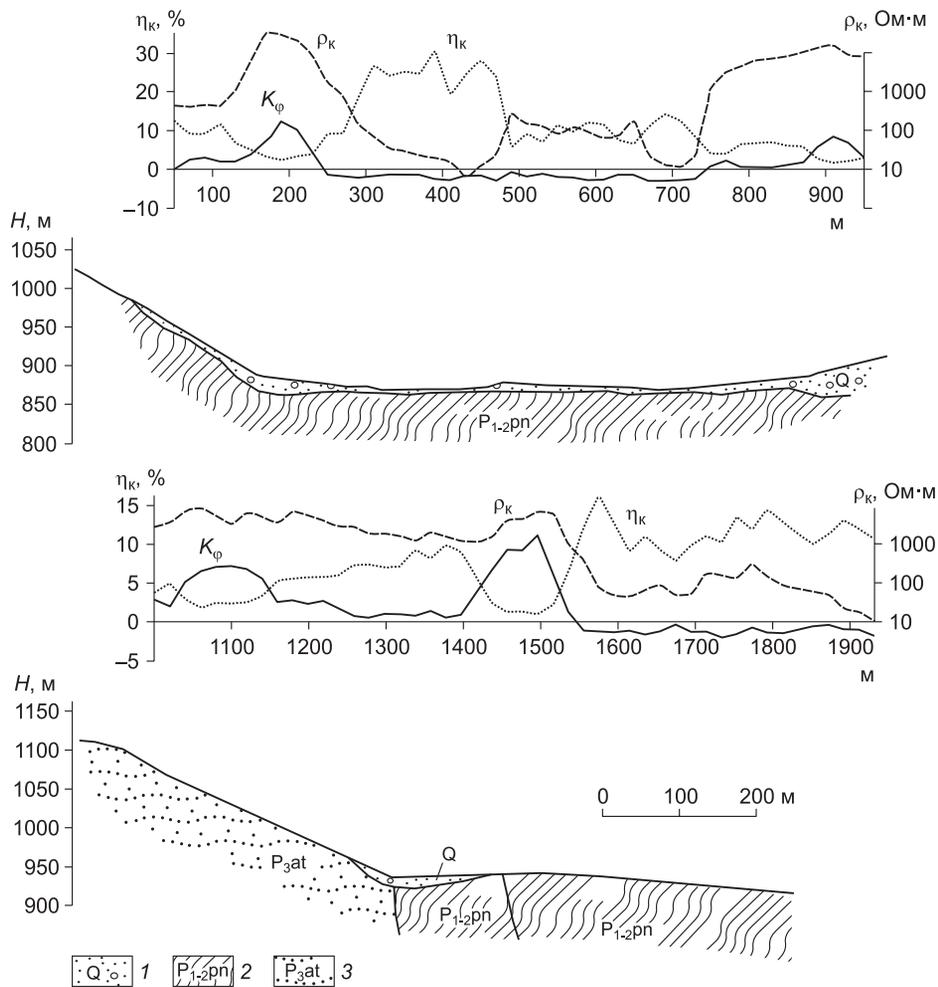
На рис. 6 приведены графики  $K_{\varphi}$  (0.305—1.22 Гц), сопротивления и поляризуемости на частоте 0.305 Гц по профилю, пересекающему долину р. Токичан и по профилю в районе контакта углистых алевролитов с пачкой песчанистых пород. При измерениях использовалась трехэлектродная установка А200-500В40М20N. Хорошо заметны области положительных значений  $K_{\varphi}$  над песчанистыми породами и сильнольдистыми отложениями террас, а также отрицательные значения параметра над графитизированными породами. Как отмечал В.А. Комаров [1980], графитизация пород является важнейшим фактором, который необходимо учитывать при интерпретации аномалий ВП. Поскольку разнообразные процессы метаморфизма пород, содержащих углерод, приводят к образованию графита, области регионального динамометаморфизма отмечаются огромными площадными аномалиями ВП интенсивностью до 25—30 %, такими же интенсивными линейными аномалиями фиксируются крупные тектонические зоны смятия. Таким образом, графитизация во многих случаях усложняет обнаружение рудных тел, но иногда служит главным, а то и единственным косвенным признаком того или другого полезного ископаемого [Комаров, 1980].

На рассматриваемой территории графит широко распространен в пределах золоторудных месторождений как в метасоматически измененных породах в виде порошковатых (аморфных) выделений различных форм, так и в виде тончайших пленок, развитых по зернистым агрегатам кварц-карбонатного и кварцевого состава [Гончаров и др., 2002].

Вероятно, присутствие графитовой минерализации может указывать на наличие интенсивных термодинамических преобразований горных пород, которые происходят на всех стадиях рудного процесса, связанного с проявлением тектонической и(или) магматической деятельности. Обогащенные графитом области уверенно выделяются по отрицательным значениям коэффициента  $K_{\varphi}$ , т. е. по нисходящей ветви ФЧХ в диапазоне частот 0.305—1.220 Гц.

Ниже приводятся результаты исследований материалов многочастотного профилирования по параметру  $K_{\varphi}$ , выполненные авторами для различных золоторудных месторождений и рудопроявлений Магаданской области.

**Стахановское рудное поле** находится в пределах Право-Берелехского золоторудно-россыпного узла, который объединяет многочисленные золоторудные проявления (Буровое, Стахановец, Тенгкелях,



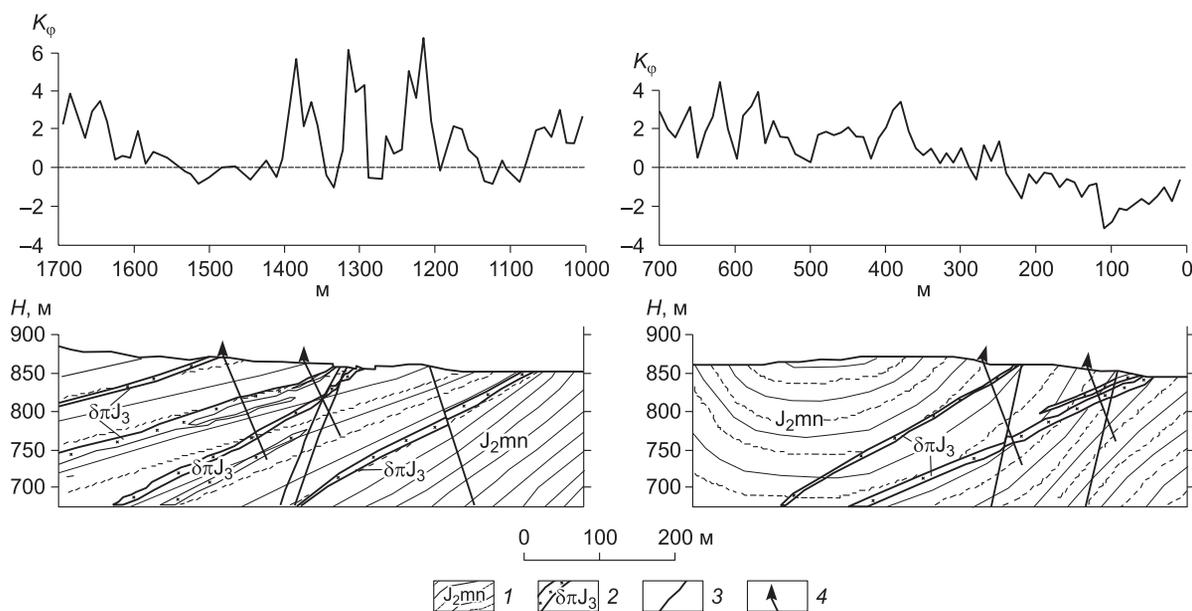
**Рис. 6. Графики сопротивления, поляризуемости и коэффициента  $K_\phi$  над графитизированными осадочными породами.**

1 — современные (верхнечетвертичные) аллювиальные галечники, пески, суглинки пойм и надпойменных террас разного уровня. Техногенные гале-эфельные отвалы; 2 — пионерская свита. Углистые алевролиты с редкими прослоями аргиллитов и тонко-мелкозернистых песчаников; 3 — атканская свита, песчаные, песчано-галечково-гравийные глинисто-алевритовые диамектиты, линзовидные пласты, пачки алевролитов, мелкотонкозернистых песчаников, песчаных гравелитов.

Евгар), а также россыпи золота (Хатакчан, Хевкандя и др.). В геологическом строении Стахановского рудного поля участвуют среднеюрские терригенные отложения, прорванные дайками среднего состава (диорит-порфириды и кварцевые диорит-порфириды) позднеюрского возраста нера-бохапчинского интрузивного комплекса. Рудные тела представлены кварцевыми жилами, зонами прожилкового окварцевания, минерализованными зонами дробления и минерализованными дайками, сопровождаемые зонами углеродистого метасоматоза. Наиболее распространенным типом рудных тел в пределах рудного поля являются интенсивно березитизированные дайки и залежи диорит-порфиридов, кварцевых диорит-порфиридов, вмещающие зоны штокверкового кварцевого прожилкования.

По результатам работ методом ВП выявлено, что выходы интенсивно березитизированных даек среднего состава, несущие золоторудную минерализацию и сопровождаемые по зальбандам зонами углеродистого метасоматоза, фиксируются отрицательными значениями  $K_\phi$ . В данном случае установленный факт является уверенным диагностическим признаком присутствия золотого оруденения (рис. 7).

**Лево-Берелехская перспективная площадь** сложена нижнеюрскими песчаниками, алевролитами и слюдястыми аргиллитами. Рудные интервалы приурочены к кварцево-жильным образованиям в измененных (пропилитизированных и окварцованных) дайках среднего и кислого состава нера-бохапчинского комплекса поздней юры. На участке прогнозируется золото-кварцевое оруденение прожилко-



**Рис. 7. Графики коэффициента  $K_\phi$  над выходами рудоносных березитированных даек среднего состава, Стахановское рудное поле.**

1 — мяунджинская свита, песчаники, алевролиты, аргиллиты; 2 — рудоносные дайки и залежи березитизированных диорит-порфиров; 3 — тектонические нарушения; 4 — скважины поисково-разведочного бурения.

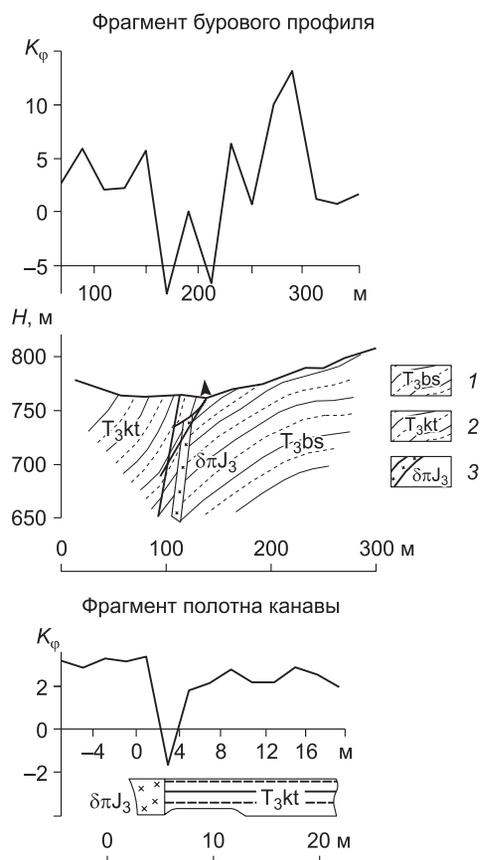
во-жильного морфогенетического типа в измененных дайках с концентрированным в бананцах золотым оруденением. Рудная минерализация распределена неравномерно, гнездами, приуроченными к зальбандовым частям прожилков; представлена пиритом, арсенопиритом, галенитом, золотом. На контактах даек, несущих золотое оруденение, выявлены зоны углеродистого метасоматоза.

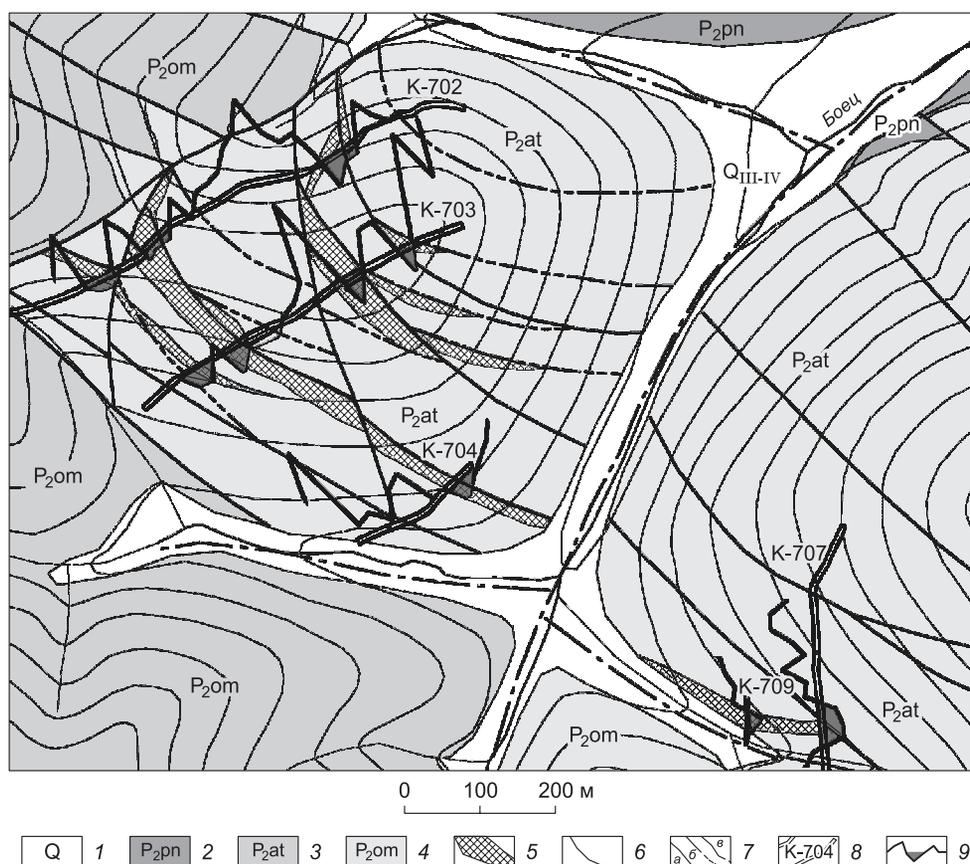
Исследованиями методом ВП в пределах рудных интервалов золотоносных даек установлено, что отрицательными значениями коэффициента  $K_\phi$  зарегистрированы зоны углеродистого метасоматоза, расположенные в области контактов этих даек с вмещающими породами (рис. 8).

**Площадь Токичанского рудного поля** сложена терригенными отложениями пермского возраста пионерской ( $P_{1-2pn}$ ), атканской ( $P_{3at}$ ) и омчакской свит ( $P_{3om}$ ). Рудные тела представлены сериями зон кварцевого (кварц-сульфидного) прожилкования и прожилково-вкрапленной минерализации, которые приурочены к пологим тектоническим зонам дробления, милонитизации и углеродистого метасоматоза, проявленного на контакте прослоев грубообломочных пород с тонкозернистыми разностями. Рудная минерализация составляет в среднем 3—5 %; представлена арсенопиритом, реже пиритом, галенитом, сфалеритом, в подчиненном количестве присутствует халькопирит, пирротин, шеелит, самородное золото.

**Рис. 8. Графики коэффициента  $K_\phi$  над выходами рудоносных даек среднего состава, Лево-Берелехская перспективная площадь.**

1 — большевикская свита, алевролиты, песчаники; 2 — кондрандинская толща, слюдястые аргиллиты, песчаники; 3 — рудолокализирующие дайки диорит-порфиров. Остальные усл. обозн. см на рис. 7.





**Рис. 9. Графики коэффициента  $K_\phi$  над рудовмещающими минерализованными тектоническими зонами дробления, Токичанское рудное поле.**

1 — современные (верхнечетвертичные) аллювиальные галечники, пески, суглинки пойм и надпойменных террас разного уровня, техногенные гале-эфельные отвалы; 2 — пионерская свита, углистые алевролиты с редкими прослоями аргиллитов и тонкомелкозернистых песчаников; 3 — атканская свита, песчаные, песчано-галечково-гравийные глинисто-алевритовые диамектиты, линзовидные пласты, пачки алевролитов, мелкотонкозернистых песчаников, песчанистых гравелитов; 4 — омчакская свита, глинистые и песчанистые алевролиты с прослоями известковистых песчаников, пласты разнозернистых, гравийных песчаников и гравелитов; 5 — тектонические зоны дробления и милонитизации пород, сопровождаемые интенсивным прожилково-жильным окварцеванием, углеродистым метасоматозом и прожилково-вкрапленным оруденением; 6 — геологические границы; 7 — тектонические нарушения: *a* — основные, *b* — второстепенные, *e* — скрытые под толщей рыхлых отложений; 8 — горные выработки; 9 — графики  $K_\phi$  по полотну канав, сплошной заливкой обозначены области отрицательных значений коэффициента.

Рудные зоны, межзонное пространство и внешние зальбандовые части фиксируются единой аномалией ВП (до 12 %) и отражают общее положение гидротермально-метасоматически измененных пород. При этом рудные зоны четкого аномального эффекта не имеют. Исследования, проведенные в пределах аномалии ВП по полотну разведочных канав, показывают, что отрицательным значениям коэффициента  $K_\phi$  отвечают пологие тектонические зоны дробления и милонитизации пород, которые вмещают рудоносное прожилково-жильное окварцевание, сопровождающееся зонами углеродистого метасоматоза и сульфидной минерализацией (рис. 9).

Таким образом, метод ВП в многочастотном варианте уверенно выделяет зоны углеродистого метасоматоза, которые сопровождают золоторудную кварц-сульфидную минерализацию и могут являться ее надежным индикатором. Независимо от формационного (золото-кварцевого, золото-редкометалльного, золото-полиметаллического) и морфологического типа золотого оруденения обогащенные графитом области фиксируются отрицательными значениями коэффициента  $K_\phi$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительное количество рудных месторождений золота северо-востока России генетически связаны с малыми интрузиями и минерализованными зонами тектонических нарушений — областями и зонами контактного и динамического метаморфизма. Как показывает практика полевых исследований,

подобным геологическим образованиям сопутствует сульфидная и графитовая минерализация, которые создают идентичные аномалии поляризуемости. Разделение зарегистрированных аномалий ВП по генезису надежно производится многочастотными электроразведочными наблюдениями. Локальные области и зоны отрицательных значений параметра  $K_{\varphi}$ , фиксирующего графитизированные объекты, могут представлять значительный поисковый интерес и служить надежным индикатором перспективности исследуемых территорий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А.** Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 2002, 250 с.
- Горячев Н.А.** Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2003, 143 с.
- Дортман Н.Б.** Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. М., Недра, 1984, 455 с.
- Еремин Н.И.** Неметаллические полезные ископаемые. М., Изд-во Моск. ун-та, ИКЦ «Академкнига», 2007, 459 с.
- Комаров В.А.** Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1980, 391 с.
- Комаров В.А., Рысс Ю.С.** Некоторые результаты применения метода вызванной поляризации на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая // Разведка и охрана недр, 1959, № 2, с. 31—36.
- Кормильцев В.В., Жаворонкова В.В.** Импеданс поверхности полупроводникового минерала. Теория и практика электротометрии // Труды Института геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1972, с. 75—84.
- Куликов В.А., Яковлев А.Г.** Практическое применение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов // Геофизика, 2008, № 6, с. 55—60.
- Куликов А.В., Шемякин Е.А., Горюнов А.С., Жильников В.Д., Мариненко В.А., Федосеев П.Ф., Шевченко В.П.** Методические рекомендации по применению аппаратуры для низкочастотной фазовой электроразведки. М., ВНИИГеофизика, 1985, 167 с.
- Лемец В.И., Орлов Г.В., Мицкевич Т.Л., Кузьмин П.В.** Применение фазовых частотных характеристик при классификации аномалий поляризуемости // Применение методов разведочной геофизики в Казахстане и Средней Азии. Л., НПО «Рудгеофизика», 1983, с. 11—19.
- Лемец В.И., Сарбаш В.Ф., Орлов Г.В., Мицкевич Т.Л., Кузьмин П.В., Мариненко В.А., Федосеев П.Ф.** Методические рекомендации по применению станции ЭВП-203 при электроразведочных работах на стадии поисков месторождений полезных ископаемых. Алма-Ата, КазВИРГ, 1986, 127 с.
- Паздникова Ю.В., Оленченко В.В., Авгулевич Д.Л.** Метод выделения продуктивных зон минерализации в условиях углеродистого метасоматоза // Горный журнал, 2010, № 5, с. 37—39.
- Сарбаш В.Ф., Лемец В.И., Жильников В.Д., Орлов Г.В., Мицкевич Т.Л., Федосеев П.Ф.** Методические рекомендации по фазовым измерениям электромагнитных полей при поисковых площадных исследованиях в рудных районах. Алма-Ата, КазВИРГ, 1980, 153 с.
- Смирнова А.А., Оленченко В.В.** Разделение аномалий ВП по типам поляризующихся объектов на примере Пильнинского рудного поля // Российский геофизический журнал, 2006, вып. 43—44, с. 136—140.
- Тархов А.Г., Федынский В.В.** Электроразведка. Справочник геофизика. М., Недра, 1980, 518 с.
- Улитин Р.В., Исаев Л.Т., Человечков А.И.** Результаты опробования метода поляризации на переменном токе на оловорудных месторождениях Приморья. Теория и практика электротометрии // Труды Института геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1972, с. 120—129.
- Человечков А.И., Гуревич А.М., Кормильцев В.В.** Изучение электродного импеданса минералов на частотах 0.0004—100 Гц в связи с вызванной поляризацией на переменном токе. Теория и практика электротометрии // Труды Института геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1972, с. 85—91.
- Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М., Михалицына Т.И.** Петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля // Тихоокеанская геология, 2008, т. 27, № 5, с. 89—103.
- Шестернев Д.М., Карасев А.П., Оленченко В.В.** Исследование криолитозоны методом РСВП. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 238 с.
- Hubbard C.G., West L.J., Rodriguez-Blanco J.D., Shaw S.** Laboratory study of spectral induced polarization responses of magnetite — Fe<sup>2+</sup> redox reactions in porous media // Geophysics, 2014, v. 79, p. D21—D30.

**Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H.** Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // *Geophysics*, 1978, v. 43, p. 588—609.

**Zonge K.L., Hughes L.J.** The complex resistivity method. Zonge Engineering & Research Organization, Inc., 1980, 32 p.

**Weller A., Slater L., Nordsiek S., Ntarlagiannis D.** On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple datasets // *Geophysics*, 2010, v. 75, № 4, p. WA105-Wa112.

**Weller A., Slater L., Nordsiek S.** On the relationship between induced polarization and surface conductivity: Implications for petrophysical interpretation of electrical measurements // *Geophysics*, 2013, v. 78, № 5, p. D315—D325.

*Рекомендована к печати 30 марта 2017 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 18 ноября 2015 г.,  
после доработки — 17 января 2017 г.*